

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТОРЦОВЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве методических  
указаний к лабораторной  
работе для студентов  
и слушателей ФПК ИТР

КУЙБЫШЕВ 1985

В методических указаниях изложены основные вопросы аналитического и экспериментального исследования динамических характеристик торцовых гидростатических уплотнений. Приводится описание экспериментального стенда и методика эксперимента.

Методические указания предназначены для студентов специальностей 0537 и 0538, выполняющих УИРС и дипломные проекты, а также для слушателей ФПК ИТР и студентов, обучающихся по программе ЦИПС.

Авторы-составители: А. И. Беловсов.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТГСУ . . . . .	4
1.1. Нагрузки, действующие на уплотнение ДЛА . . . . .	4
1.2. Ограничения и допущения, принимаемые в расчете . . . . .	4
1.3. Выбор расчетной схемы ТГСУ . . . . .	5
1.4. Основные зависимости, характеризующие динамические свойства ТГСУ . . . . .	6
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТГСУ 10	
2.1. Программа экспериментальной отработки ТГСУ 10	
2.1.1. Цель и задачи испытаний . . . . .	11
2.1.2. Требования к испытательному оборудованию . . . . .	12
2.1.3. Информативность испытаний и требования к системам измерений . . . . .	12
2.1.4. Методы обработки результатов измерений 16	
2.2. Установка для исследования динамических характеристик ТГСУ . . . . .	17
2.3. Методика эксперимента . . . . .	23
Контрольные вопросы . . . . .	26
Вопросы для исследования . . . . .	26
Содержание отчета . . . . .	26
Библиографический список . . . . .	27

В настоящее время наиболее эффективным (а порой и единственным) вариантом уплотнения вращающихся валов для условий работы в составе современных двигателей летательных аппаратов (ДЛА) является бесконтактное торцовое гидростатическое уплотнение (ТГСУ) с газовой или жидкостной смазкой [1]. Эти уплотнения, благодаря активному использованию в них методов, разработанных для проектирования и расчета гидро- и газостатических подшипников, признанию допустимыми определенных утечек и регулированию этих утечек, позволяют осуществить герметизацию в течение длительного времени в жестких условиях, в которых нельзя рассчитывать на торцовые контактные или лабиринтные уплотнения, широко распространенные в современных ДЛА.

Однако научные рекомендации по проектированию ТГСУ, обладающих заданными статическими и динамическими свойствами, весьма ограничены. Условия эксплуатации уплотнений ДЛА потребовали создания научно обоснованных методик расчета и экспериментального исследования динамических характеристик ТГСУ, удовлетворительно работающих во всем диапазоне рабочих нагрузок.

Наличие таких методик и использование их в инженерной практике позволит увеличить надежность ДЛА, уменьшить материальные затраты на экспериментальные исследования и доводку, а также уменьшить время на создание новых двигателей летательных аппаратов.

Поэтому целью работы является ознакомление студентов с аналитическими и экспериментальными методиками определения динамических характеристик ТГСУ. Эти методики разработаны на основании исследований, проведенных авторами лабораторной работы в отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Вибрационная прочность и надежность авиационных изделий» КуАИ.

# 1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРЦОВОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ

## 1.1. НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА УПЛОТНЕНИЯ ДЛА

Уплотнения современных ДЛА работают в очень напряженных условиях. Перепады давления рабочего тела (жидкости или газа) на уплотнении достигают нескольких десятков мегапаскалей. Температура изменяется от 20 до 1500 К и выше. Скорости скольжения в парах трения достигают в некоторых случаях 250 м/с, а диаметры расположения уплотнений — нескольких дециметров.

Динамические нагрузки на уплотнения, обусловленные высокими частотами вращения ротора, вибрацией элементов двигателя и вызывающие колебания деталей уплотнения, в совокупности со статическими (большие перепады давления и температуры вызывают деформацию деталей уплотнения) и эксплуатационными нагрузками (изнашиваемость деталей, адсорбция уплотнительной среды, естественное старение деталей и т. п.) зачастую приводят к преждевременному и непрогнозируемому выходу уплотнения из строя.

Большая часть повреждений в уплотнениях происходит в результате возникновения в них опасной вибрации. Поэтому при проектировании ТГСУ необходимо учесть влияние на него динамического воздействия, уметь рассчитывать его параметры при колебаниях деталей и узлов двигателя.

## 1.2. ОГРАНИЧЕНИЯ И ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНИМАЕМЫЕ В РАСЧЕТЕ

Конструктивные схемы исследуемых ТГСУ приведены на рис. 1.1.

Основные допущения, принимаемые в расчете: течение в торцовом зазоре радиальное, осесимметричное, ламинарное, изотермическое; рабочие поверхности недеформируемые, идеально гладкие и параллельные; давление по толщине пленки постоянное; силы инерции отсутствуют; изменение зазора при колебаниях рабочего торца ротора мало по сравнению со средней величиной





дого тела (невращающееся кольцо уплотнения), безынерционной упруговязкой подвески (рабочий слой) и упругого элемента жесткостью  $k$  (сильфон, пружины и т. п.). Это упрощает исследование, так как позволяет использовать известные методы теории колебаний и дает четкое представление о динамических особенностях ТГСУ. Упругие свойства ТГСУ, обусловленные сжимаемостью рабочего слоя в камере, характеризуются пружиной  $c_1$ , демпфирование, связанное с выдавливанием рабочего тела из камеры, — демпфером  $d_1$ . Сжимаемость рабочей среды в торцевой щели учитывается пружиной  $c_2$ , а демпфирование, вызываемое выдавливанием из этой щели, — демпфером  $d_2$ . Гидростатический эффект учитывается пружиной  $c_3$ , эквивалентной статической жесткости. Для этой модели характерно, что демпфирующая сила действует не непосредственно между массой невращающегося кольца  $m$  и деталью ротора, а через пружины  $c_1$  и  $c_2$ , смягчающие влияние демпферов, особенно при ударном воздействии, т. е. используется модель с релаксационным механизмом демпфирования.

Такой подход к аналитическому исследованию динамических характеристик уплотнений, заключающийся в исследовании передаточных функций моделей с релаксационным демпфированием, позволяет сравнительно просто проводить анализ и синтез различных конструкций ТГСУ.

#### 1.4. ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТГСУ

Для определения динамических характеристик ТГСУ необходимо знать динамическую реакцию рабочего слоя на изменение его величины:

$$C_{\text{дин}} = - \frac{\partial W}{\partial h},$$

где  $C_{\text{дин}}$  — динамическая реакция рабочего слоя;  $W$  — несущая способность слоя;  $h$  — величина зазора.

Приращение несущей способности ТГСУ при изменении величины зазора на  $\Delta h$  можно представить в виде

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2, \quad (1)$$

где  $\Delta W_1$ ,  $\Delta W_2$  — приращения несущих способностей камеры и щели.

В работе [3] получены выражения

$$\Delta W_1 = c \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \Delta h; \quad \Delta W_2 = c \frac{T_4 s}{1 + T_3 s} \Delta h, \quad (2)$$

где  $c$  — статическая жесткость уплотнения;  $T_1 = \frac{1}{a_0 - a_1} \rho_K F_K$  — по-

стоянная времени опережения, учитывающая чувствительность расходных характеристик на изменение зазора;  $T_2 = \frac{1}{b_2 - b_1} V_k \frac{p_k}{n p_k}$  — постоянная времени запаздывания, учитывающая чувствительность расходных характеристик на изменение давления в камере;  $a_1 = \frac{\partial \dot{m}_{вх}}{\partial h}$ ,  $a_2 = \frac{\partial \dot{m}_{вых}}{\partial h}$ ,  $b_1 = \frac{\partial \dot{m}_{вх}}{\partial p_k}$ ,  $b_2 = \frac{\partial \dot{m}_{вых}}{\partial p_k}$  — коэффициенты;  $\rho_k$ ,  $p_k$ ,  $F_k$ ,  $V_k$  — плотность, давление рабочего тела в камере, площадь и объем камеры;  $n$  — коэффициент полнотропы;  $\dot{m}_{вх}$ ,  $\dot{m}_{вых}$  — расходы на входе в камеру и на выходе из камеры;

$$T_3 = \frac{12 \mu}{\pi^2 n h^2} \left[ \frac{(r_3 - r_1)^2}{p_1} + \frac{(r_2 - r_4)^2}{p_2} \right];$$

$$T_4 = \frac{48 \mu}{\pi^3 h^3 c} [(r_1 + r_3) (r_3 - r_1)^3 + (r_2 + r_4) (r_2 - r_4)^3];$$

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости рабочего тела;  $h$  — величина зазора;  $r_1, r_2, r_3, r_4$  — радиусы уплотнительных поясков, нижнего и верхнего соответственно;  $p_1, p_2$  — давление рабочей среды внутри уплотнения и снаружи.

Для уплотнения с кольцевой камерой и дросселем 2 из пористого материала МР (рис. 1.1,б) /2/:

$$a_1 = 0;$$

$$a_2 = \frac{\pi h^2}{4 \mu RT} \left[ p_k^2 \left( \frac{1}{\ln \frac{r_3}{r_1}} + \frac{1}{\ln \frac{r_2}{r_4}} \right) - \frac{p_1^2}{\ln \frac{r_3}{r_1}} - \frac{p_2^2}{\ln \frac{r_2}{r_4}} \right];$$

$$b_1 = -0,035 \frac{F_{др} d^2 \Pi^3 p_k}{l (1 - \Pi)^2 \mu RT \sqrt{1 + \frac{d^2 \Pi^3 (p_{вх}^2 - p_k^2)}{2250 l (1 - \Pi)^3 \mu^2 RT}}};$$

$$b_2 = \frac{\pi h^3}{6 \mu RT} p_k \left( \frac{1}{\ln \frac{r_3}{r_1}} + \frac{1}{\ln \frac{r_2}{r_4}} \right),$$

где  $l, F_{др}, \Pi, d$  — длина, площадь, пористость дросселя, диаметр проволоки;  $p_{вх}$  — давление на входе в дроссель;  $R, T$  — универсальная газовая постоянная и температура газа в камере. Для уплотнения с кольцевой камерой и дросселем 1 в виде отверстий эти коэффициенты такие же, кроме

$$b_1 = \frac{2 \alpha F_{др}}{p_{вх} V RT} p_k,$$

где  $\alpha$  — коэффициент расхода через дроссель.

Для ТГСУ с секторными камерами или бескамерными с питающими отверстиями 3 (рис. 1.1,в) будут отличаться коэффициенты  $a_2$  и  $b_2$ , которые можно определить следующим образом:



$$a_2^* = a_2 \bar{\Theta}; \quad b_2^* = b_2 \bar{\Theta}.$$

Здесь  $\bar{\Theta}$  — относительная величина секторов. Ее можно определить по эмпирической формуле

$$\bar{\Theta} = \frac{\Theta}{2\pi} + \frac{k_0}{r_3} \left[ 10,7 \left( \frac{P_k^2 - P_2^2}{P_1^2 - P_2^2} \right)^2 - 0,71 \left( \frac{P_k^2 - P_2^2}{P_1^2 - P_2^2} \right) \right],$$

где  $\Theta$  — величина сектора, в котором расположена камера или питающие отверстия;  $k_0$  — количество камер или питающих отверстий.

Подставляя выражения (2) в уравнение (1), находим динамическую реакцию газового слоя ТГСУ:

$$C_{\text{дин}}(s) = c \frac{(T_1 T_3 + T_2 T_4) s^2 + (T_1 + T_3 + T_4) s + 1}{T_2 T_3 s^2 + (T_2 + T_3) s + 1}. \quad (3)$$

Анализ динамической реакции рабочего слоя, представленной в виде передаточной функции, способствует удобному и глубокому исследованию динамических характеристик ТГСУ.

Подставляя в выражение (3)  $s = i\omega$  ( $i = \sqrt{-1}$ ), получаем частотную характеристику в виде суммы двух составляющих, сдвинутых по фазе на  $\pi/2$ :

$$C_{\text{дин}} = C_{\text{упр}}(\omega) + iD(\omega),$$

где

$$C_{\text{упр}}(\omega) = c \frac{(T_1 T_3 + T_2 T_4) T_2 T_3 \omega^4 + (T_1 T_2 + T_3 T_4) \omega^2 + 1}{T_2^2 T_3^2 \omega^4 + (T_2^2 + T_3^2) \omega^2 + 1}$$

упругая составляющая функции  $C_{\text{дин}}$ , представляющая собой динамическую жесткость уплотнения;

$$D(\omega) = c \omega \frac{T_3 (T_1 - T_2) + T_2^2 T_4}{T_2^2 T_3^2 \omega^4 + (T_2^2 + T_3^2) \omega^2 + 1}$$

диссипативная составляющая  $C_{\text{дин}}$ , характеризующая демпфирование газового слоя.

Динамическая жесткость и демпфирование определяются вязкоупругими свойствами рабочего тела в камере и зазоре и определяют частотные характеристики и устойчивость ТГСУ.

Для нахождения частотных характеристик торцовое гидростатическое уплотнение рассматривается в виде модели (рис. 1.2). Уравнение равновесия сил, действующих на подвижную массу уплотнения, имеет следующий вид:

$$m\ddot{x}_2 + C_{\text{дин}} x_2 + kx_2 = C_{\text{дин}} x_1. \quad (4)$$

Принимается, что входное воздействие на систему гармоническое, т. е.  $x_1(t) = a_0 \sin \omega t$ , где  $a_0$  — амплитуда входного воздействия;  $\omega$  — угловая частота. Такое воздействие по сравнению с другими

видами детерминированных сигналов проще создать при проведении экспериментов, оно также позволяет при минимальном объеме вычислений получить расчетные характеристики, достаточно полно отражающие динамические свойства элементов и систем. Реально оно и при малых перекосах рабочих поверхностей уплотнения. Когда исходное дифференциальное уравнение линейно, закон изменения выходной величины  $x_2$  также будет гармоническим, но в общем случае отличающимся от входного воздействия по амплитуде и по фазе. Линеаризованное уравнение равновесия ТГСУ (4) запишется следующим образом:

$$ms^2 x_2 + C_{\text{дин}}(s) x_2 + kx_2 = C_{\text{дин}}(s) x_1.$$

Передаточная функция  $K(s) = x_2/x_1$  имеет вид

$$K(s) = \frac{C_{\text{дин}}(s)}{ms^2 + C_{\text{дин}}(s) + k}$$

или, с учетом (3),

$$K(s) = \frac{c[(T_1 T_3 + T_2 T_4) s^2 + (T_2 T_3 s^2 + (T_2 + T_3) s + 1) + c \times (T_1 + T_3 + T_4) s + 1]}{(ms^2 + k) [(T_2 T_3 s^2 + (T_2 + T_3) s + 1) + c \times (T_1 + T_3 + T_4) s + 1]} \times \frac{1}{\times [(T_1 T_3 + T_2 T_4) s^2 + (T_1 + T_3 - T_4) s + 1]}^*$$

Частотная характеристика определяется формальной подстановкой  $s = i\omega$ .

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) является на комплексной плоскости годографом радиуса-вектора  $K(i\omega)$  при изменении частоты от нуля до бесконечности. Длина этого радиуса-вектора равна отношению амплитуд входной и выходной величин, а угол между радиусом-вектором и положительной частью вещественной оси равен сдвигу по фазе между колебаниями этих величин.

АФЧХ имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{A}(\bar{\omega}) = & \left\{ \left[ \left( 1 - (\omega_0 T_1)^2 \bar{\omega}^2 \left( \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_2}{T_1} - \frac{T_4}{T_1} \right) \right)^2 + (\omega_0 T_1)^2 \bar{\omega}^2 \times \right. \right. \\ & \times \left( 1 + \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_4}{T_1} \right)^2 \left. \right] / \left[ \left( \left( \frac{P_0^2}{\omega_0^2} - \bar{\omega}^2 \right) \left( 1 - (\omega_0 T_1)^2 \frac{T_3}{T_1} \bar{\omega}^2 \right) + 1 - \right. \right. \\ & \left. \left. - (\omega_0 T_1)^2 \bar{\omega}^2 \left( \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_2}{T_1} - \frac{T_4}{T_1} \right) \right)^2 + (\omega_0 T_1)^2 \bar{\omega}^2 \left( \left( \frac{P_0^2}{\omega_0^2} - \bar{\omega}^2 \right) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \left( 1 + \frac{T_3}{T_1} \right) + \left( 1 + \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_4}{T_1} \right) \right)^2 \right]^{1/2}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Psi(\bar{\omega}) = \arctg \frac{(\omega_0 T_1) \bar{\omega} \left( 1 + \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_4}{T_1} \right)}{1 - (\omega_0 T_1)^2 \bar{\omega}^2 \left( \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_2}{T_1} - \frac{T_4}{T_1} \right)}$$

$$- \operatorname{arctg} \frac{(\omega_0 T_1) \omega \left[ \left( \frac{p_0^2}{\omega_0^2} - \bar{\omega}^2 \right) \left( 1 + \frac{T_3}{T_1} \right) + 1 + \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_4}{T_1} \right]}{\left( \frac{p_0^2}{\omega_0^2} - \bar{\omega}^2 \right) \left( 1 - (\omega_0 T_1)^2 \frac{T_3}{T_1} \bar{\omega}^2 \right) + 1 + (\omega_0 T_1)^2 \bar{\omega}^2 \left( \frac{T_3}{T_1} + \frac{T_2}{T_1} \frac{T_4}{T_1} \right)}$$

(6)

Здесь  $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ ,  $p_0 = \sqrt{k/m}$  — собственные частоты системы;  $\bar{\omega} = \omega / \omega_0$  — безразмерная частота вибрации.

АФЧХ зависит от четырех параметров:  $\omega_0 T_1$ ,  $\frac{T_2}{T_1}$ ,  $\frac{T_3}{T_1}$ ,  $\frac{T_4}{T_1}$ .

АЧХ ТГСУ показывает, как пропускает система сигнал различной частоты. Оценка пропускания производится по соотношению амплитуд выходного и входного сигналов, т. е.  $x_2/x_1$ . ФЧХ показывает фазовые сдвиги, вносимые системой на различных частотах.

Из полученных АЧХ можно приблизительно определить демпфирование и жесткость по следующим формулам:

$$D = \mu r_3 \left( \frac{r_3}{h_0} \right)^3 \frac{\omega_0^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}; \quad c_{\text{упр}} = m \omega_0^2.$$

(7)

Здесь  $\omega_0$  — собственная частота ТГСУ;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — частоты, соответствующие пересечению АЧХ с линией, параллельной оси абсцисс, на уровне 0,707 от максимального значения резонансной характеристики.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТГСУ

### 2.1. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ТГСУ

Недостаточно полные знания о закономерностях протекания процессов, сложность прогнозирования свойств материалов в условиях конкретных ТГСУ, высокие требования к надежности обуславливают необходимость экспериментальной отработки таких уплотнений.

Для реализации экспериментальных методов исследования уплотнений можно проводить натурные и стендовые эксперименты. Натурные эксперименты при различных эксплуатационных режимах, выполненные с использованием современных технических и научных средств эксперимента, дают наиболее полную и достоверную информацию о поведении уплотнений. Однако осуществление таких экспериментов сопряжено с высокой стоимостью работ (известно, что стоимость авиационного ГТД каждые 5 лет возрастает на 30% /4/); сложностью доступа к элементам уплотнений в работающем двигателе; ограниченной (часто исключаемой) возможностью изменения параметров уплотнения, что затрудняет

оценку их влияния на характеристики ТГСУ как динамической системы.

Поэтому при исследовании ТГСУ чаще всего пользуются стендовыми экспериментами, свободными от перечисленных недостатков. Установки должны обеспечить проведение экспериментов в необходимом объеме при воспроизведении условий, близких или подобных реальным условиям эксплуатации ТГСУ в составе двигателя. Поэтому стендовые испытания рассматриваются как завершающий этап создания ТГСУ и как средство совершенствования существующих конструкций уплотнений на основе оптимальных решений.

Получение достоверных фактических параметров с потребной точностью сопряжено с решением целого ряда сложных задач, связанных с выбором соответствующих систем измерения при испытаниях, разработкой требований к техническим средствам, обеспечивающим высококачественные результаты испытаний, условиям их проведения, к обработке информации. Решение поставленных задач позволяет создать обоснованную, приближенную к оптимальной, программу испытаний.

Основные принципы построения такой программы испытаний для контактных (торцовых и радиально-торцовых) уплотнений валов вновь разрабатываемых или модернизируемых двигателей были сформулированы авторами настоящих методических указаний при разработке отраслевой методики /5/. Ниже эти принципы трансформированы применительно к бесконтактным торцовым уплотнениям — ТГСУ.

### 2.1.1. Цель и задачи испытаний

На основе анализа информации и теоретических разработок ТГСУ определяются цель и задачи экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводятся для проверки работоспособности, для определения степени достоверности теоретических методов исследования ТГСУ, а также для выработки основных принципов и подходов, необходимых при проектировании оптимальных конструкций ТГСУ.

При проведении экспериментов весьма важной задачей является максимальное приближение экспериментальной программы к натурным условиям испытания в составе изделия.

В случаях испытания уплотнений перспективных изделий, когда штатные условия их работы в полной мере еще неизвестны, целесообразно выводить крайние режимы работы, которые отвечали бы, с одной стороны, весьма «жестким» градиентам нарастания давления и температуры в зоне уплотнения и, с другой, — условиям обеспечения затяжного запуска.



Процесс стендового испытания уплотнения состоит из трех основных этапов: подготовительные работы; испытание; анализ и оценка результатов.

Подготовительные работы заключаются в подготовке стендового оборудования и систем измерения основных параметров ТГСУ.

Стадия испытания включает в себя: монтаж уплотнения на стенде, пуск установки, фиксирование измеряемых параметров, послепусковые проверки и работы.

Стадия анализа и оценки результатов состоит из обработки и анализа измерений, дефектаций деталей ТГСУ, составления отчета по испытанию.

### **2.1.2. Требования к испытательному оборудованию**

Цель и задачи испытаний позволяют установить основные требования к испытательному оборудованию ТГСУ ДЛА, состоящие в следующем.

1. Установка должна быть универсальной, т. е. обеспечивать возможность проведения исследований ТГСУ различных типов в различных рабочих условиях.

2. Должно обеспечиваться поддержание рабочих параметров на необходимом уровне и изменение их в заданном диапазоне.

3. Стенд должен иметь оснащение для дистанционного регулирования параметров при высокой степени автоматизации.

4. Материалы, из которых изготовлены детали установки, должны быть стойкими к воздействию рабочих тел ДЛА.

5. Должно быть обеспечено удобство эксплуатации испытательного оборудования при подготовке и проведении испытаний.

6. Стенд должен обладать необходимым запасом прочности и обеспечивать безопасную работу исследователя.

Для выполнения этих требований необходимо обеспечить: плавное изменение частоты вращения ротора; наилучший доступ и обзор исследуемого узла; наличие фильтров, исключающих загрязнение среды продуктами коррозии, износа и предохраняющих исследуемый узел от случайных загрязнений; возможность изменения и фиксации основных параметров.

### **2.1.3. Информативность испытаний и требования к системам измерений**

В ходе экспериментальных исследований получаемая информация бывает двух видов /6/:

1. Количественная параметрическая информация о физических характеристиках и техническом состоянии ТГСУ. Первичным источником этой информации являются измерительные приборы для фиксирования установившихся или быстроменяющихся процессов. К ним относятся различного рода датчики замера давления, расхода, температуры, частоты вращения, перемещения, амплитуды и

частоты вибрации и т. д. Замеряемая информация передается к регистрирующим и запоминающим устройствам. Такая информация дает представление о процессах в ТГСУ в любой момент времени, в том числе в момент проявления отказа, включая предысторию и послесловие. Это очень важно при анализе причины отказа. Однако при количественной оценке надежности использовать указанный объем очень трудно.

2. Качественные и количественные характеристики в виде частоты безотказной работы, времени наработки до отказа и т. д. Показатели надежности определяются по результатам испытаний. Некоторые из них могут оцениваться по результатам краткосрочных, контрольных и других видов испытаний.

Для качественной оценки результатов испытаний обычно используются статистические методы, основанные на фиксировании параметров ТГСУ, количества отказов и т. п.

В экспериментах измеряются и фиксируются все или некоторые из следующих параметров: частота вращения вала; давление и температура среды; распределение давления в зазоре; величина зазора в паре трения; утечка среды; амплитуда и частота вибраций вращающегося и невращающегося колец уплотнения.

Наиболее сложным является измерение параметров, характеризующих процессы, происходящие в рабочем зазоре ТГСУ.

Измерение давления в зазоре производится, в основном, электрическими методами. Общим для всех применяемых методов является то, что воздействие давления вызывает деформацию чувствительного элемента, которая преобразуется в электрический сигнал либо путем изменения параметров электрической цепи (омического сопротивления, индуктивности, емкости, частоты переменного тока), либо путем генерирования энергии. Однако использование для измерения давления отверстий на рабочей поверхности, сообщающихся с какими-либо датчиками давления, вносит значительную ошибку в измерения. Поэтому наиболее приемлемы для измерения давления пьезоэлектрические датчики, встроенные непосредственно в трущиеся поверхности и защищенные от воздействия среды и трения тонкими металлическими пластинками, расположенными заподлицо с поверхностью. К недостаткам такого способа измерения относится зависимость чувствительности от температуры и емкости кабеля и недостаточная временная стабильность. Для замера давления в зазоре используются также специальные, например, разработанные в МЭИ полупроводниковые тензорезисторные малогабаритные датчики.

Для измерения зазора в парах трения используют в основном емкостный и индукционный методы [6]. Для измерения емкостным методом служат емкостные датчики, которые обычно закрепляются в неподвижном кольце пары трения заподлицо с его рабо-



чей поверхностью. Второй обкладкой конденсатора служит вращающееся кольцо пары трения. Измерения емкостными датчиками возможны лишь на средах с электроизолирующими свойствами. Ошибки при измерениях этим методом возникают вследствие неопределенности величины диэлектрической постоянной среды, находящейся в контролируемом зазоре. Для измерения зазоров в средах, не имеющих хороших изолирующих свойств, используется индукционный метод. Он менее чувствителен, чем емкостной. Точность измерения индукционным методом в еще большей степени зависит от посторонних электрических влияний.

Методом, позволяющим получить сигнал, не зависящий от свойств рабочего тела, находящегося в зазоре, является токовых-ревой метод, получающий все большее распространение.

Иногда применяют метод просвечивания зазора икс- или гамма-лучами от радиоактивного источника, укрепленного на неподвижной или вращающейся детали /7/. С изменением величины зазора изменяется интенсивность лучей, проходящих через него. Эта интенсивность определяется приемниками, установленными у выхода из зазора. Этот метод отличается высокой чувствительностью (сотые доли микрометра), не требует токоъемников, может быть применен для большинства сред (единственное требование — достаточная для излучения прозрачность среды).

Для замера расхода через торцовое уплотнение используется объемный метод и расходомеры. В среднем объем одной капли жидкости равен  $10 \text{ мм}^3$  /7/. Он зависит от сил поверхностного натяжения жидкости. В случае легкоиспаряющихся жидкостей собирают пары в герметичном объеме и конденсируют их на охлаждаемых стенках. Если объем жидкости мал, сумму утечек определяют, наблюдая снижение уровня в какой-либо емкости (при помощи водомерного стекла или уровнемера).

Расходомеры бывают разных типов: тахометрические, с приемными преобразователями в виде сужающих устройств, ротаметры, электромагнитные, ультразвуковые.

В тахометрических расходомерах движущийся поток жидкости или газа вызывает вращение ротора преобразователя. Скорость вращения измеряется тем или иным тахометрическим устройством и является мерой скорости или расхода потока. Одна из главных особенностей тахометрических преобразователей — частотная модуляция — позволяет использовать сигнал непосредственно для обработки на счетных машинах без перевода его в дискретную форму. Кроме того, частота сигнала связана только со скоростью вращения ротора и практически не зависит от внешних факторов, в отличие от напряжения или тока выходного сигнала. В связи с этим устраняются многочисленные источники погрешности измерения.

Расходомеры с приемными преобразователями в виде сужающих устройств широко используются для измерений однофазных жидкостей и газов. Сужающее устройство представляет собой местное гидравлическое сопротивление, создающее потери давления в трубопроводе. Возможность применения сужающих устройств определяется постоянством коэффициента расхода  $\alpha$  в выражении, связывающем перепад давления  $\Delta p$  на сужающем устройстве с расходом:

$$Q = \alpha F \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где  $F$  — площадь сужающего устройства;  $\rho$  — плотность потока. Сужающие устройства используются в комплекте с пьезометрами. Основная погрешность сужающих устройств составляет примерно  $\pm 1\%$ .

Основные детали ротаметра — это вертикальная коническая трубка и поплавков. Высота подъема поплавка определяется равенством веса поплавка силам, действующим на него со стороны потока жидкости. Основная погрешность ротаметра обычно составляет  $\pm 2,5\%$ . Показания ротаметра зависят от точности их установки в вертикальном положении. К значительным недостаткам ротаметров относится сильная зависимость их показаний от физических свойств жидкости, особенно вязкости.

Для измерения расхода электропроводимых жидкостей используется электромагнитный расходомер, представляющий собой отрезок трубы из немагнитного материала, расположенный между полюсами магнита. В протекающей по трубе жидкости за счет взаимодействия с магнитным полем наводится ЭДС, пропорциональная средней по сечению скорости потока. Измерение ЭДС, производится с помощью двух электродов, расположенных в стенке трубы на линии, перпендикулярной магнитному потоку. Электроды имеют электрический контакт с жидкостью, но изолированы от трубы. Расходомер может применяться и в том случае, когда жидкость содержит газовые пузыри.

Ультразвуковые расходомеры основаны на взаимосвязи между скоростью потока и скоростью распространения звуковых колебаний между двумя точками трубопровода. Первичный преобразователь такого расходомера представляет собой отрезок трубопровода с установленным на его стенках двумя пьезоэлектрическими элементами, играющими роль излучателя и приемника высокочастотных колебаний. Измеряемым параметром может быть сдвиг фаз или разность частот колебаний, направленных по потоку и против него.

Частота и амплитуда вибрации деталей торцовых уплотнений измеряются обычно пьезоэлектрическими датчиками, у которых

собственная частота колебаний на порядок (и более) выше частоты вибрации.

К системам измерений предъявляются следующие основные требования:

1. Высокая точность измерения. С ростом частоты вращения все большее значение приобретают вопросы динамики и неустановившихся процессов, что требует повышения чувствительности и уменьшения инерционности контрольно-измерительного оборудования.

2. Высокая надежность измерительной аппаратуры. Требование высокой надежности диктуется тем, что потеря информации может привести к невыполнению задач испытаний. С целью повышения надежности используется принцип дублирования измерений по разным измерительным каналам.

3. Высокая помехоустойчивость измерительной аппаратуры при работе стенда.

4. Автоматизация процесса управления измерительной аппаратурой.

5. Дистанционность измерений.

#### **2.1.4. Методы обработки результатов измерений**

Обработка результатов измерений включает первичную и вторичную обработку. Первичная обработка (дешифровка) представляет собой совокупность математических преобразований числовых значений измерительной информации, в результате которых получают функциональные зависимости параметров от времени. При вторичной—производятся математические преобразования над результатами первичной обработки, в результате которых получают характеристики уплотнения.

Математические преобразования при первичной обработке включают определение градуировочных коэффициентов (масштаба записи) и масштабирование результатов измерений. Способы первичной обработки зависят от метода регистрации результатов измерений. При регистрации на фотобумагу или киноплёнку основные операции — считывание и выделение нужной информации — производятся вручную; при регистрации на магнитную ленту эти операции выполняются автоматически на ЭВМ.

При ресурсных испытаниях получаемые результаты носят статистический характер и поэтому требуют соответствующей обработки. Разработка вопросов экстраполяции результатов испытаний, форсирование испытаний с целью более быстрого получения результатов и рационального планирования эксперимента имеет очень большое значение при ресурсных испытаниях, так как сокращает сроки окончания работ и ускоряет внедрение их результатов. Разработка этих вопросов тесно связана с изучением рабочего процесса того или иного уплотнения и его моделированием.



Форсирование испытаний уплотнений может проводиться по давлению, температуре, скорости вращения /7/. Методика пересчета результатов испытаний с одного параметра на другой для каждого элемента уплотнения различна и требует всестороннего исследования. При этом необходимо рассмотреть взаимосвязь между надежностью элементов и узла уплотнения в целом.

## 2.2. УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТГСУ

Общий вид стенда /8/ с измерительным и регистрирующим комплексом, системами подвода рабочего тела и другим необходимым оборудованием приведен на рис. 2.1. Установка, общий вид которой показан на рис. 2.2, детали — на рис. 2.3, конструктивная схема — на рис. 2.4, а принципиальная схема — на рис. 2.5, представляет собой корпус 4, имеющий изготовленные заодно с ним газовые подшипники 2, в которых вращается ротор 1, расположенный вертикально и опирающийся на поршневую пневмостатическую опору, образованную крышкой 22, нижними частями корпуса и ротора 1.

Приводом ротора служит закрепленная на нем воздушная микротурбина 15.

На верхний фланец корпуса крепится крышка 8 с установленным в ней исследуемым уплотнительным узлом 11.

Ротор 1 выполнен из материала Х18Н9Т и покрыт хромом. Толщина покрытия 40 мкм. Рабочий торец ротора имеет высоту микронеровностей  $R_z \leq 0,16$  мкм и неплоскостность не более 0,3 — 0,6 мкм. Такое состояние поверхности достигнуто притиркой.

Корпус 4 установки изготовлен из материала Х18Н9Т. Алюминиевый сопловой аппарат 18 запрессован в корпус между подшипниками 2, имеющими диаметры 94 мм и 80 мм. Газовые подшипники — бескамерные, с подводом газа через дросселирующие отверстия. Количество дросселей — 12, диаметр 0,9 мм, длина 3 мм. Рабочий зазор между подшипниками и ротором составляет 20 мкм. Установка ротора на газостатические подшипники позволила получить высокую точность вращения и в значительной степени снизить влияние на процесс трения внешней вибрации за счет демфирующих свойств газового смазочного слоя в подшипниках.

В уплотнительном узле 11 имеется втулка 7, приваренная к сильфону, являющемуся упругим и разделительным элементом. К втулке 7 при помощи гайки 5 крепится кольцо 6 исследуемого уплотнения. На втулке 7 закреплены два поршня 13, по которым обеспечивается подвод внешнего давления в камеру торцового гидростатического уплотнения. Верхняя 8 и нижняя 22 крышки крепятся к корпусу установки двенадцатью болтами и уплотня-

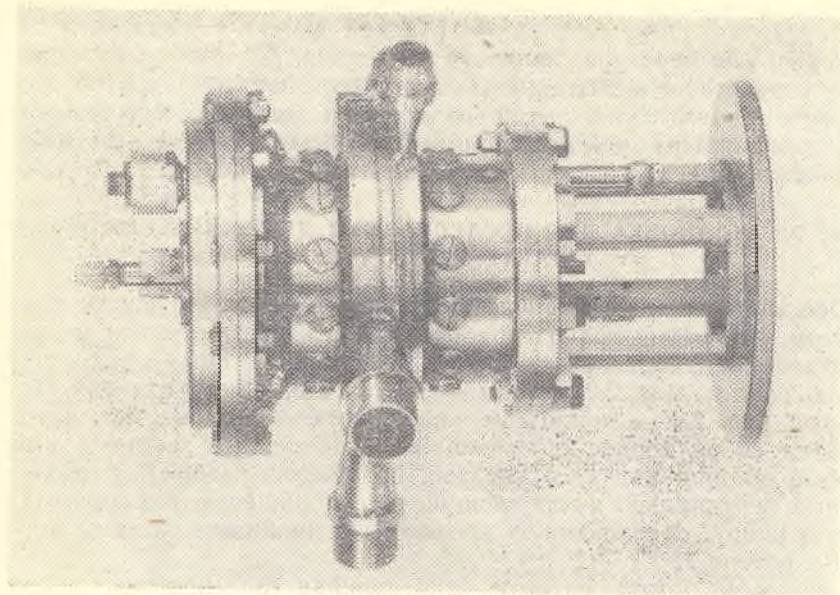


Рис. 2.2. Общий вид экспериментальной установки

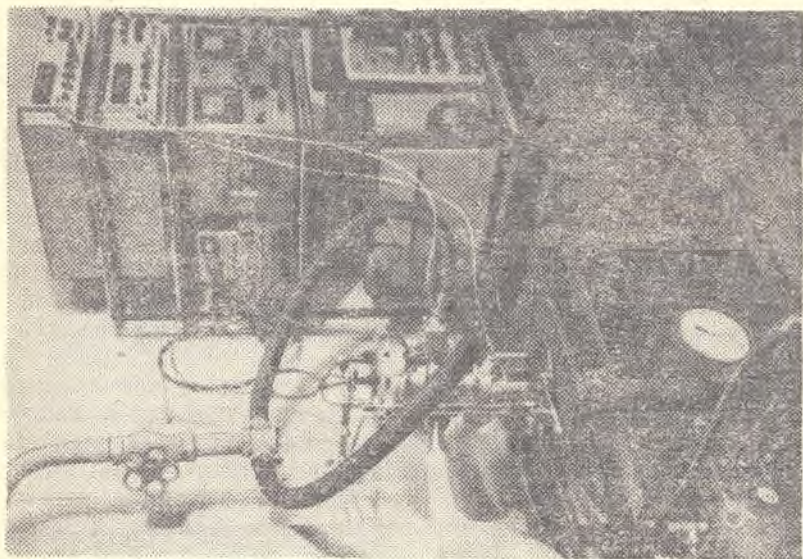


Рис. 2.1. Общий вид экспериментального стенда



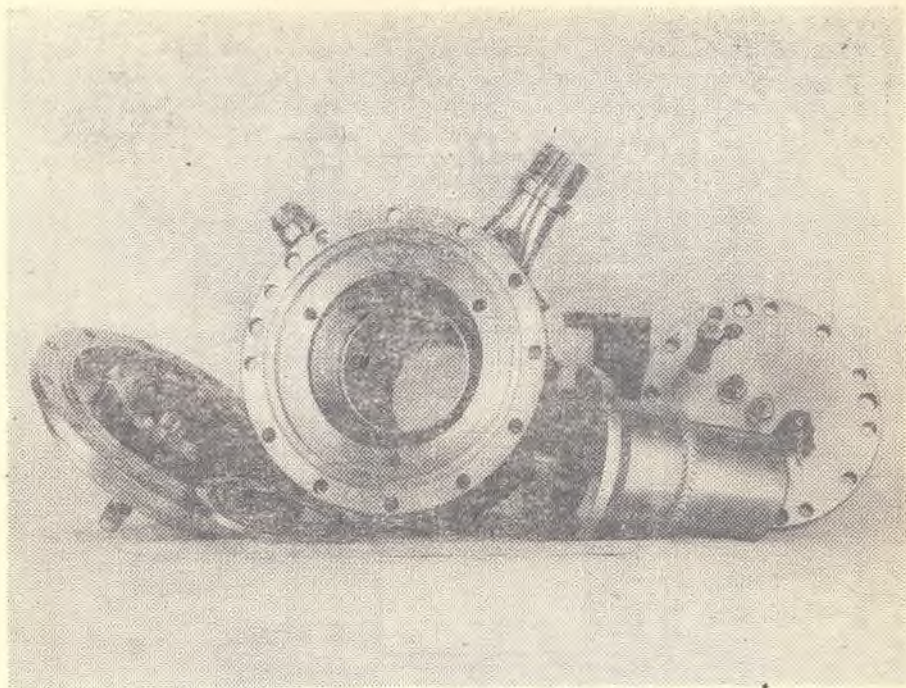


Рис. 2.3. Детали экспериментальной установки

ются прокладками. Вся установка крепится к столу через подставку. При проведении исследований воздух, подаваемый от сети под давлением 0,6 МПа через устройство типа П-ППВ  $\frac{16-12}{10}$  для очистки и сушки сжатого воздуха, подводится к подшипникам и пневмоопоре через штуцеры 21 и 19. Давление подводимого воздуха контролируется образцовыми манометрами с пределами измерения до 1,0 МПа, класс точности 0,4.

Устройство для очистки сжатого воздуха обеспечивает очистку воздуха от влаги, масла, твердых частиц. Тонкость фильтрации — 0,2 мкм, степень очистки — 99,9%.

В подшипники воздух подводится ( см.рис. 2.4) через кольцевую проточку «а» по двенадцати вертикальным каналам «б», а выходит по кольцевым проточкам «в» через дренажные штуцеры. Подшипники отделены от полостей турбины и исследуемого уплотнения лабиринтами 23 (высотой 2 мм), выполненными в корпусе.

Рабочее тело турбины (воздух под давлением 0,6 МПа) подводится по двум патрубкам 17, через коллектор 16, приваренный к корпусу 4, а выходит по патрубкам 3.



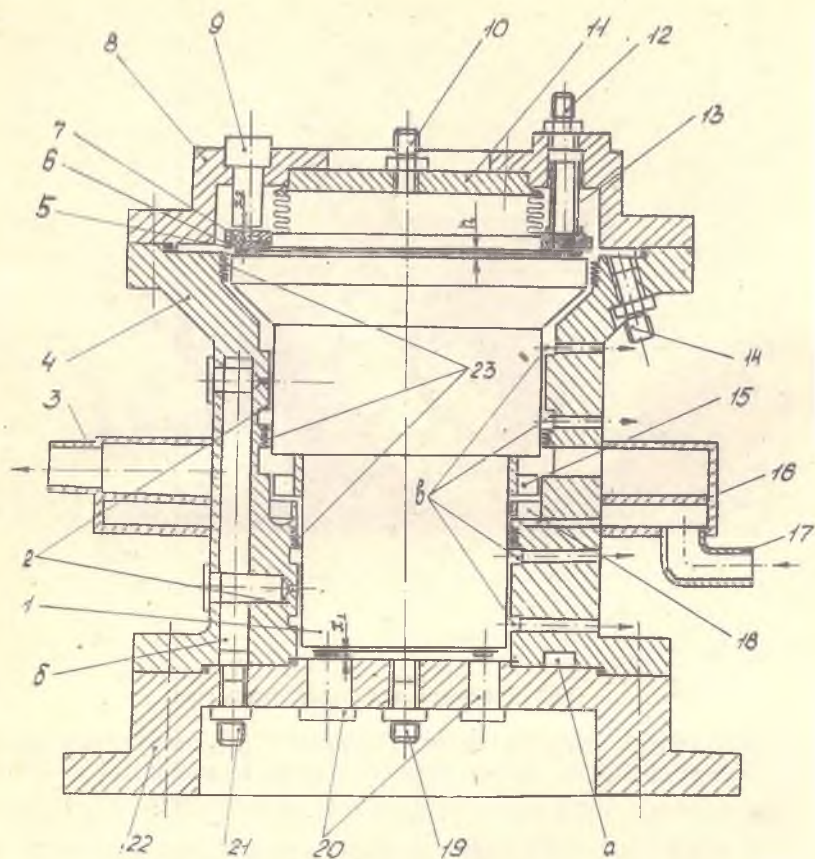


Рис. 2.4. Конструктивная схема установки для исследования торцовых уплотнений

В верхней крышке корпуса 8 имеется два штуцера 12, через которые рабочее тело через поршни 13 и каналы во втулке 7 подается в камеры исследуемого уплотнения 6. Через штуцер 10 в уплотняемую полость подводится уплотняемая среда, а утечки отводятся через штуцер 14, и количество их измеряется либо пьезометром, либо объемным методом, либо турбинным датчиком расхода типа ТДР 2-1-3 с выводом сигнала на электронный частотомер ЧЗ-35. Диапазоны измерения датчика (0,004—0,016) мм<sup>3</sup>/с. Погрешность в диапазоне измерения расхода  $\pm 1\%$ .

Давление  $p_1$  уплотняемой и  $p_{вх}$  рабочей сред измеряется образцовыми манометрами с пределами измерения до 1,0 МПа,

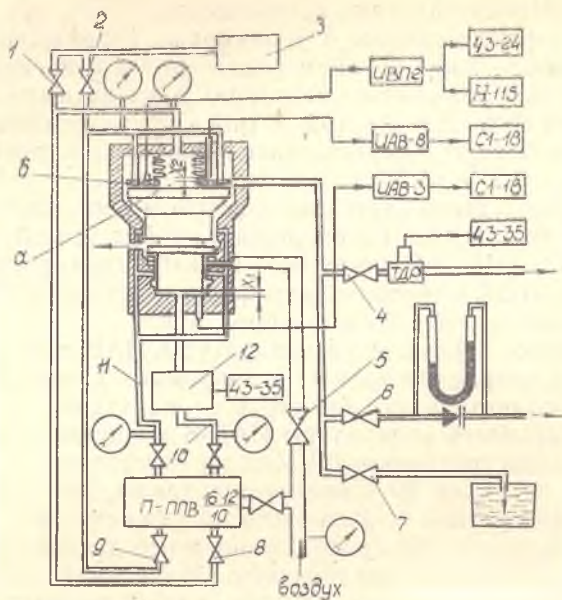


Рис. 2.5. Принципиальная схема экспериментальной установки

класс точности 0,4, а давление  $p_k$  в камере торцового гидростатического уплотнения — двумя малогабаритными индуктивными дифференциальными датчиками давления ДМИ-6-1 с диапазоном измерения 0,6 МПа и погрешностью в диапазоне измерения  $\pm 3\%$ . Для запитки и усиления сигналов, поступающих с первичных преобразователей давления (ДМИ), используются приборы ИД-2И или ИВП-2. Для регистрации давления в камере при исследовании торцовых гидростатических уплотнений используются два канала измерения светолучевого осциллографа Н-115, подключенного к выходу ИВП-2.

При необходимости измерения частоты пульсаций давления сигнал от ДМИ, усиленный в ИВП-2, подается на цифровой частотомер ЧЗ-24.

Измерение зазора  $h$  (рис. 2.4) в уплотнении производится при помощи токовихревых датчиков, которые в комплекте с аппаратурой типа ИАВ-3 и ИАВ-8 изготовлены в КуАИ. Такой метод позволяет получить сигнал, который не зависит от свойств рабочего тела, находящегося в зазоре. Основные технические характеристики этой аппаратуры следующие: диапазон измеряемых частот — 0-100000 Гц; основная погрешность не более  $\pm 5\%$ ; мощность, потребляемая от сети — 60 Вт; время непрерывной рабо-

ты — 12 ч. Четыре датчика перемещений 9 (см. рис. 2.4) расположены на верхней крышке 8 и измеряют перемещение втулки 7 с прикрепленным к ней кольцом уплотнения 6 относительно крышки. Эти датчики размещены на концах двух взаимно перпендикулярных диаметров. Два других датчика 20 закреплены в нижней крышке 22 и измеряют перемещение  $x_1$  ротора 1 относительно этой крышки.

Зазор  $h$  легко вычисляется по известным перемещениям  $x_1$  и  $x_2$ .

Сигналы от датчиков перемещений, пройдя усилительную аппаратуру ИАВ-3 и ИАВ-8, поступают на вход двухлучевых осциллографов типа С1-18, на которых регистрируются либо путем визуального наблюдения, либо фотографирования.

Кроме этого, в комплекте аппаратуры ИАВ имеются стрелочные приборы, отградуированные в микрометрах, что позволяет осуществить дополнительную регистрацию показаний.

Чувствительность аппаратуры ИАВ-8 в комплекте с токовихревыми датчиками составляет 0,1 мкм на расстоянии 1000 мкм.

Один из датчиков 20 используется также для измерения частоты вращения ротора 1. Для этого на нижнем торце ротора имеется риска, которая при прохождении мимо датчика дает всплеск амплитуды на экране осциллографа. Измерение частоты вращения ротора осуществляется методом калиброванных длительностей развертки. Пневмопривод обеспечивает плавное изменение частоты вращения ротора от 0 до 80000 об/мин. Верхний предел ограничен прочностью материала турбины 15.

Для исследования колебаний торцовых уплотнений используется генератор гармонических колебаний давления воздуха, изготовленный в КуАИ, подключенный к штуцеру 19 подвода давления в поршневую пневмостатическую опору. Основные технические характеристики генератора следующие: диапазон изменения среднего давления в рабочей камере генератора колебаний давления —  $(1-4) \cdot 10^5$  Па; расход воздуха — не более 0,02 кг/с; диапазон частот пульсаций давления — 0,5—2400 Гц; диапазон амплитуд пульсаций давления — до  $0,2 \cdot 10^5$  Па; форма сигнала — близкая к гармонической; давление воздуха на входе в генератор — до  $8 \cdot 10^5$  Па. Генератор гармонических колебаний представляет собой совокупность электромеханического привода модулирующего диска, рабочей и резонансной камер. Принцип генерирования пульсаций давления основан на периодическом прерывании потока воздуха, вытекающего в атмосферу из сопла, установленного в рабочей камере.

Воздух из рабочей камеры вытекает через сопло, выходное сечение которого периодически перекрывается модулирующим диском, установленным перпендикулярно выходному сечению сопла с торцовым зазором порядка 0,1 мм.



Для изменения частоты пульсаций давления предусмотрено регулирование частоты колебаний генератора.

Все детали установки изготовлены из коррозионно-стойкого материала и работоспособны в среде различных жидкостей и газов, в том числе и агрессивных, в диапазоне изменения температур, ограниченном работоспособностью датчиков давления и перемещения. Это позволяет свести к минимуму влияние температурных деформаций (при работе на криогенных или горячих рабочих телах), поскольку у всех деталей одинаковый коэффициент линейного расширения.

Габариты установки с подставкой:  $0,375 \times 0,375$  м. Установка для исследования торцовых уплотнений позволяет за счет форсирования скорости скольжения в уплотнении, частоты и амплитуды колебаний подвижного кольца, удельных нагрузок проводить эквивалентные испытания уплотнений, т. е. испытания, позволяющие в короткие сроки выявить основные дефекты исследуемой конструкции уплотнения, проверить мероприятия по их устранению и оценить ресурс уплотнения.

Благодаря наличию сменных рабочих уплотнительных колец возможна быстрая и простая их замена в процессе исследования.

Наличие устройств возбуждения и регистрации колебаний уплотнений позволяет исследовать колебания различных типов торцовых уплотнений при различных режимах их работы.

Одним из преимуществ этой установки, выгодно отличающим ее от известных подобных конструкций, является мобильность, поскольку она обладает малыми габаритами и массой не более 25 кг, и для ее функционирования достаточно давления воздуха не более 0,6 МПа. Для питания контрольно-измерительных приборов используется электрическая сеть с напряжением 220 В при частоте тока 50 Гц. Использование таких источников энергии и наличие дистанционного управления установкой обеспечивает безопасную работу с ней. При проектировании экспериментальной установки были заложены также ее параметры (окружная скорость в зоне уплотнения — до 460 м/с, давление уплотняемой криогенной и высокотемпературной среды — до 5 МПа, частота осевой вибрации ротора — до 2400 Гц), которые соответствуют не только современным условиям работы уплотнений ДЛА, но и учитывают тенденции изменения этих условий.

### 2.3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения планомерного и последовательного эксперимента используется следующая методика.

Эксперименты проводятся на сжимаемом рабочем теле (воздухе), поскольку исследование несжимаемой жидкости является частным случаем сжимаемой (при  $\rho = \text{const}$ ).

Выражение для расхода через уплотнение в функциональном виде записывается через безразмерные параметры  $M = f(H^3, A, p_1, p_2, R_1, R_3, R_4, R_2)$ . В это выражение входит ряд независимых переменных, связанных с условиями эксплуатации уплотнения, которые способны изменяться независимо от других параметров.

Для выявления влияния этих параметров на расходные характеристики уплотнений необходимо в процессе эксперимента измерять следующие физические величины: зазор в уплотнении  $h$ , давления на входе в дроссель  $p_{вх}$ , в уплотняемой полости  $p_1$  и на выходе из уплотнения  $p_2$ , а также необходимо знать геометрические параметры уплотнения.

В нашем случае можно приблизительно предсказать случайную погрешность ожидаемых опытных данных. Если результат является функцией отношения и произведения нескольких величин, то квадрат относительной ошибки результата равен сумме квадратов относительных ошибок отдельных измерений. Выражение, по которому производится расчет опытных данных для параметра уплотнения, соответствует этому правилу.

Из условий равномерного распределения экспериментальных точек при планировании эксперимента задаем интервал изменения зазора  $\Delta h = 4 \dots 5$  мкм. Предполагаемый эксперимент приближенно можно считать воспроизводимым, т. е. по желанию экспериментатора приборы и установку можно вернуть в любое предыдущее состояние. Для такого случая при снятии расходной характеристики уплотнения целесообразным является случайный (рандомизированный) план эксперимента.

Зная интервал между измеряемыми величинами, можно определить необходимое количество замеров при снятии одной расходной характеристики. Эта величина может составлять  $N = \frac{h}{\Delta h} = \frac{30}{5} = 6$ .

Таким образом, надо исследовать расходные характеристики уплотнения при различных параметрах  $A$ , геометрических параметрах и давлениях. По количеству выбранных независимых переменных  $\dot{m} = f(h^3, A, p, r_0)$  получается четырехфакторный эксперимент. Принимаем классический план исследования, который представляет собой последовательность однофакторных экспериментов, в качестве которых выступают расходные характеристики, снятые при различных  $h$  при фиксированных  $A, p, r_0$  и наоборот.

Согласно этой методике испытания на установке проводятся в следующей последовательности:

1. Собирается и устанавливается одно из имеющихся ТГСУ (по согласованию с консультантом).

2. Подается воздух в устройство П-ППВ  $\frac{16-12}{10}$ .

3. Открываются краны на трубопроводах 10 и 11 (рис. 2.5).

При этом сухой очищенный воздух поступает на газостатические подшипники и через генератор осевых колебаний 12 — в опору большого хода. Давление в подшипниках поддерживается равным 0,45...0,55 МПа.

4. В полость уплотнения «а» и камеру «б» подается рабочее тело (в зависимости от положения кранов 1, 2, 8, 9—это вода или масло от насосной станции 3 или воздух от П-ППВ). Записываются в журнал наблюдений давления в полостях «а» и «б» ( $p_1$  и  $p_2$ ).

5. После уравнивания ротора в осевом направлении, когда силы давления в полостях «а» и «в» и сила упругости сильфона уравниваются силой статического давления в поршневой пневмостатической опоре, по приборам ИАВ и С1-18 выставляются нули датчиков перемещения.

6. Контролируется утечка через уплотнение. В зависимости от вида рабочего тела контроль ведется либо ГДР, либо при помощи дроссельной шайбы и пьезометра, либо объемным методом. Способ замера осуществляется кранами 4, 6, 7.

7. Устанавливается зазор в ТГСУ  $h_0 = 5$  мкм. Этот зазор обеспечивается или изменением давления в камере уплотнения (кранами 2 или 9), или изменением давления в опоре большого хода.

8. Производится замер утечки через уплотнение.

9. Возбуждаются осевые колебания ротора при помощи генератора колебаний 12. Частота колебаний изменяется в диапазоне от 10 до 2000 Гц. При этом контролируются по приборам ЧЗ-24, Н-115, С1-18 и ЧЗ-35 амплитуда  $f$  и частота колебаний  $\omega$  ротора и кольца уплотнения, а также расход. Показания приборов фиксируются на пленке или бумаге и записываются в журнал наблюдений.

10. Измерения по пп. 7—9 повторяются при наличии вращения ротора. Для этого открывается кран 5 подвода воздуха на турбину. Измерения проводятся при частоте вращения ротора  $\omega_p = 10, 100, 200, 300$  Гц.

11. Устанавливается зазор  $h_0 = 10$  мкм и повторяются измерения по пп. 7...10.

12. Устанавливается зазор  $h_0 = 15$  мкм и повторяются измерения по пп. 7...10.

13. По полученным экспериментальным данным строятся АЧХ и расходные характеристики ТГСУ при различных рабочих параметрах ( $h_0, \omega_p, p_1, p_2$ ), которые сравниваются с расчетными зависимостями, полученными по аналитическим выражениям из разд. 1.

14. Определить расхождение теоретических и экспериментальных результатов и проанализировать причины их несовпадения.



По полученным результатам сделать выводы, включающие анализ исследованных ТГСУ (при какой частоте АЧХ имеет максимум, как влияют осевые колебания ротора на расход через уплотнение) и рекомендации по проектированию уплотнений для различных динамических режимов работы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить нагрузки, действующие на уплотнения ДЛА.
2. Какие допущения принимаются при расчете ТГСУ?
3. Дать понятие о динамической жесткости и демпфировании газового слоя ТГСУ.
4. Какие особенности АЧХ ТГСУ?
5. Какие цели и задачи испытаний ТГСУ?
6. Перечислить этапы стендовых испытаний уплотнений.
7. Какие требования предъявляются к испытательному оборудованию?
8. Какие требования предъявляются к системам измерения?
9. Какие параметры необходимо фиксировать при экспериментальном исследовании?
10. Каким образом производится обработка результатов измерений?
11. Устройство установки и порядок работы на ней.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Выявить влияние проницаемости дросселей на динамическую жесткость, демпфирование и АЧХ ТГСУ.
2. Экспериментально выявить влияние давления воздуха на динамические характеристики ТГСУ (утечки и АЧХ).
3. Экспериментально определить АЧХ для различной ширины камер ТГСУ.
4. Экспериментально выявить влияние частоты вращения ротора на утечку.
5. Экспериментально определить утечку и АЧХ при различных значениях зазора в ТГСУ.
6. Определить демпфирование в ТГСУ по экспериментально снятым АЧХ. Выявить влияние конструктивных параметров ТГСУ на демпфирование.
7. Экспериментально определить влияние податливости рабочих поверхностей ТГСУ на демпфирование и АЧХ.

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Расчетная схема ТГСУ с указанием величин, необходимых для расчета.

2. Динамические характеристики ТГСУ, полученные расчетным путем.
3. Значения параметров, полученные в ходе экспериментов.
4. Графики расчетных и экспериментальных значений АЧХ и расхода.
5. Анализ полученных результатов.
6. Литература.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов А. И., Зрелов В. А. Статические характеристики торцового гидростатического уплотнения: Лабораторная работа по УИРС. — Куйбышев; КуАИ. 1978. — 14 с.
2. Белоусов А. И., Зрелов В. А., Фалалеев С. В. Теоретическое и экспериментальное исследование торцовых гидростатических уплотнений из пористого упругодемпфирующего материала МР. — В кн.: Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела АЭС, ч. 1. — Минск: ИЯЭ АН БССР, 1982, с. 149—157.
3. Белоусов А. И., Зрелов В. А., Чегодаев Д. Е. Исследование торцовых уплотнений с газостатической разгрузкой. — В кн.: Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела энергетических установок, ч. III. — Минск: ИЯЭ АН БССР, 1977, с. 131—140.
4. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1976. — 216 с.
5. Методика 32—83. Оценка работоспособности и эффективности контактных уплотнений валов на установках и в составе двигателя. — М.: 1983. — 8 с.
6. Махин В. А., Миленко Н. П., Пронь Л. В. Теоретические основы экспериментальной отработки ЖРД. — М.: Машиностроение, 1973. — 284 с.
7. Голубев А. И. Торцовые уплотнения вращающихся валов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1974. — 212 с.
8. А. с. 779689 (СССР). Установка для исследования торцовых уплотнений / Белоусов А. И., Зрелов В. А. — Оpubл. в БИ, 1980, № 42.

Авторы-составители: *Анатолий Иванович Белоусов,  
Владимир Андреевич Зрелов, Сергей Викторович Фалалеев*

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРЦОВЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Редактор Т. К. К р е т и н и н а  
Техн. редактор Н. М. К а л е н ю к  
Корректор В. П. П е т р о в а

Сдано в набор 20.08.85 г. Подписано в печать 19.11.85 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл. п. л. 1,63. Уч-изд. л. 1,6. Т. 500 экз. Заказ 599. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.